



考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

李珍萍, 周文峰, 张煜炜, 杨光, 刘嵘

引用本文:

李珍萍, 周文峰, 张煜炜, 等. 考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2999–3005.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无人飞行器航迹方案的VIKOR择优评价

Unmanned aerial vehicle path scheme optimal evaluation based-VIKOR

控制与决策. 2020, 35(12): 2950–2958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0415>

参数未知的离散系统Q-学习优化状态估计与控制

Q-learning optimal state estimation and control for discrete systems with unknown parameters

控制与决策. 2020, 35(12): 2889–2897 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0180>

复合类别航站楼分配问题的改进和声搜索算法

Solving composite airport gate allocation problem with improved harmony search

控制与决策. 2020, 35(11): 2743–2751 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0242>

双层多态加权 k/n 系统可用性模型与冗余设计优化

Availability modeling and redundancy design optimization of dual hierarchical multi-state weighted k/n system

控制与决策. 2020, 35(11): 2752–2760 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1752>

微型无人机集群低时延组网规划方法

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

控制与决策. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

李珍萍^{1†}, 周文峰², 张煜炜^{1,3}, 杨光¹, 刘嵘¹

(1. 北京物资学院 信息学院, 北京 101149; 2. 北京物资学院 实验教学中心, 北京 101149; 3. 首都经济贸易大学 管理工程学院, 北京 100070)

摘要: 研究考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题, 已知油库使用容量有限的多隔舱运输槽车为加油站配送多种类型的成品油, 每个隔舱只能装载一种特定的油品, 且装载到各个隔舱中的油品具有固定的卸载顺序. 已知加油站对各种油品的需求量, 假设每个加油站对同一种油品的需求只能由一辆车配送, 考虑配送车辆的固定动用成本和运输成本, 以总配送成本极小化为目标建立该问题的混合整数规划模型, 并设计求解模型的自适应大邻域搜索启发式算法. 利用不同规模的算例进行模拟计算与分析, 从而验证算法的有效性. 实验结果显示: 对于小规模算例, 大邻域搜索启发式算法能够以较高的概率得到全局最优解; 对于中、大规模算例, 大邻域搜索启发式算法可以在短时间内得到近似最优解, 近似比不超过 1.2. 所提出的模型和算法可为石油公司制定成品油二次配送计划提供理论依据和决策支持.

关键词: 成品油二次配送; 隔舱运输; 卸载顺序约束; 车辆路径问题; 混合整数规划

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.1756

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 李珍萍, 周文峰, 张煜炜, 等. 考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2999-3005.

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

LI Zhen-ping^{1†}, ZHOU Wen-feng², ZHANG Yu-wei^{1,3}, YANG Guang¹, LIU Rong¹

(1. School of Information, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China; 2. Experimental Teaching Center, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China; 3. School of Management Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

Abstract: The vehicle routing problem of refined oil secondary distribution with unloading sequence constraints is studied. Multi-compartment oil tankers with limited capacity are used to transport multi-types refined oil to gas stations from oil depot. Each compartment can load only one type of refined oil and the unloading sequence of each type of oil is fixed. Given the demand of each gas station for every type of refined oil, assuming that the demand for one type of refined oil from each gas station can only be served by one vehicle, to minimize the total costs including the fixed costs and transportation costs of the distribution vehicle, a mixed integer programming model is established, and a self-adaptive large neighborhood search heuristic (LNSH) algorithm is developed for solving the model. The effectiveness of the algorithm is verified by simulations and analysis on multiple scale of instances. The experimental results show that using the LNSH algorithm, the global optimal solutions of small size examples can be found with higher probability; the approximate optimal solutions of middle and large scale examples can be obtained quickly, and the approximate ratio is no more than 1.2. The model and the algorithm can provide theoretical basis and decision support for oil companies to develop refined oil secondary distribution schedules.

Keywords: refined oil secondary distribution; compartment transportation; unloading sequence constraint; vehicle routing problem; mixed integer programming

0 引言

成品油二次配送是将成品油从中转油库运送到

加油站的过程, 成品油属于液体危险品, 需要使用专用隔舱运输槽车进行配送; 在安排成品油二次配送

收稿日期: 2018-12-22; 修回日期: 2019-04-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71771028); 北京市自然科学基金项目(Z180005); 北京市高水平创新团队建设计划项目(IDHT20180510).

[†]通讯作者. E-mail: lizhenping66@163.com.

车辆路径方案时,需同时考虑运输车隔舱容量限制、不同隔舱中油品的卸载顺序约束、各种油品的最长在途运输时间限制,以及每个加油站对多种油品需求的分割配送等情况.综合考虑多种因素,成品油二次配送车辆路径问题可以抽象为考虑卸载顺序约束的多类型产品、可分割配送、隔舱运输的车辆路径问题.

虽然现有文献中没有针对同时考虑卸载顺序、分割配送、多隔舱运输等多种约束条件的车辆路径问题的研究,但已有学者针对考虑部分约束的车辆路径问题开展了研究.如:针对单一产品^[1]和多产品^[2-4]的需求可拆分车辆路径问题,针对单周期^[5]和多周期^[6]的隔舱运输车辆路径问题,考虑后进先出约束的取货送货车辆路径问题^[7],具有卸载顺序和轴重约束的车辆路径问题^[8-9],以及三维装载与车辆路径联合优化问题^[10]等.

由于成品油二次配送车辆路径问题需要同时考虑需求可拆分、隔舱运输、卸载顺序约束等,该问题比一般车辆路径问题更复杂.近年来学者们结合实际场景从不同角度对成品油二次配送问题的简化情况开展了研究,取得了一些进展,其中包括大规模成品油二次配送路径优化问题^[11],考虑配送工作量均衡^[12]的成品油二次配送问题和多油品、隔舱运输约束下的成品油二次配送路径优化问题^[13].以上研究均未考虑卸载顺序约束和需求可拆分等情况.

本文拟研究具有卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题,同时考虑加油站的多种油品需求、多隔舱运输、卸载顺序约束,加油站多种需求的拆分配送,以及各种油品的最长在途运输时间约束等,以总配送成本最小化为目标建立混合整数规划模型,并设计求解模型的大邻域搜索启发式算法.

1 考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题的数学模型

1.1 问题描述

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题(vehicle routing problem of refined oil secondary distribution with unloading sequence constraints, VRPUS)可以描述为:一个中心油库(配送中心)用同类型的隔舱运输车为 n 个加油站配送 m 种不同类型的成品油,已知加油站对各种油品需求量,每辆运输车包含 m 个容量有限的隔舱,各隔舱中装载的油品具有固定的卸载顺序;各加油站对一种油品的需求只能由一辆运输车提供一次服务,对多种油品的需求可由多辆车配送.各种油品的在途运输时间有限;已知油库、各个加油站和停车场之间的距离(时间)、

每辆车的固定动用成本及行驶每公里的单位成本等.问如何安排车辆的配送路径,才能使总成本最低.

1.2 模型假设

为了简化问题,作出如下假设:

- 1) 第 i 类油品只能装载到车辆的第 i 个隔舱,各个隔舱中油品的卸载顺序为 $1, 2, \dots, m$;
- 2) 每个加油站对同一类油品的需求量只能由一辆运输车配送,每个加油站对多种不同类型油品的需求可以由多辆运输车进行配送;
- 3) 运输车均从油库出发,完成配送任务后返回停车场(油库);
- 4) 可用运输车类型相同、数量充足,每辆运输车的固定动用成本和单位运输成本已知.

1.3 符号和变量说明

定义如下符号:

station = $\{1, 2, \dots, n\}$: 加油站的集合;

0: 油库;

$n + 1$: 停车场;

oil = $\{1, 2, \dots, m\}$: 油品类型集合,由于第 s 类油品只能装载到车辆的第 s 个隔舱,运输车辆的隔舱序号与油品类型序号相同;

truck = $\{1, 2, \dots, K\}$: 可动用隔舱运输车集合;

q_j^s : 加油站 j 对油品 s 的需求量;

$e_j^s \in \{0, 1\}$: 当 $q_j^s > 0$ 时取值为1,否则取值为0;

d_{ij} : 从节点 i 到节点 j 的距离或车辆行驶时间
 $i, j = 0, 1, \dots, n + 1$;

Q_k^s : 车辆 k 的第 s 隔舱容量;

c_k : 动用车辆 k 的固定成本;

g_k : 车辆 k 行驶单位距离的成本;

T^s : 油品 s 的最长在途运输时间;

M : 一个很大的正数.

定义如下决策变量:

t_{jk}^s : 车辆 k 为加油站 j 配送油品 s 到达加油站 j 的时刻;

$x_{ijk}^{rs} \in \{0, 1\}$: 当车辆 k 为加油站 i 配送完油品 r 后直接到加油站 j 并为其配送油品 s 时, $x_{ijk}^{rs} = 1$, 否则 $x_{ijk}^{rs} = 0$;

$y_{jk}^s \in \{0, 1\}$: 当车辆 k 为加油站 j 配送油品 s 时, $y_{jk}^s = 1$, 否则 $y_{jk}^s = 0$;

$z^k \in \{0, 1\}$: 取1表示动用车辆 k , 否则取0.

1.4 模型建立

VRPUS问题可以表示成混合整数规划模型

$$\min f = \sum_{k=1}^K c_k z_k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \sum_{r=1}^m \sum_{s=1}^m g_k x_{ijk}^{rs} d_{ij}. \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^{n+1} \sum_{s=1}^m x_{0jk}^{1s} = 1, k = 1, 2, \dots, K; \quad (2)$$

$$y_{0k}^1 = 1, k = 1, 2, \dots, K; \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{r=1}^m x_{i,n+1,k}^{rm} = 1, k = 1, 2, \dots, K; \quad (4)$$

$$y_{n+1,k}^m = 1, k = 1, 2, \dots, K; \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{jk}^s = e_j^s, j = 1, 2, \dots, n, s = 1, 2, \dots, m; \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{r=1}^s x_{ijk}^{rs} = y_{jk}^s, j = 1, 2, \dots, n, \\ k = 1, 2, \dots, K, s = 1, 2, \dots, m; \quad (7)$$

$$\sum_{l=1}^n \sum_{u=s}^m x_{jlk}^{su} = y_{jk}^s, j = 1, 2, \dots, n, \\ k = 1, 2, \dots, K, s = 1, 2, \dots, m; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^m y_{jk}^s \leq Mz_k, k = 1, 2, \dots, K; \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n q_j^s y_{jk}^s \leq Q_k^s, k = 1, 2, \dots, K, s = 1, 2, \dots, m; \quad (10)$$

$$t_{ik}^r + d_{ij} \leq t_{jk}^s + M(1 - x_{ijk}^{rs}), r \leq s, \\ i = 0, 1, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n+1, s = 1, 2, \dots, m, \\ r = 1, 2, \dots, s, k = 1, 2, \dots, K; \quad (11)$$

$$t_{ik}^r \leq t_{ik}^s + M(1 - x_{iik}^{rs}), r \leq s, i = 1, 2, \dots, n, \\ s = 1, 2, \dots, m, r = 1, 2, \dots, s, k = 1, 2, \dots, K; \quad (12)$$

$$x_{ijk}^{rs} = 0, r > s, i = 0, 1, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n+1, \\ k = 1, 2, \dots, K, s = 1, 2, \dots, m, \\ r = s, s+1, \dots, m; \quad (13)$$

$$x_{iik}^{rs} = 0, r > s, i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, K, \\ s = 1, 2, \dots, m, r = s, s+1, \dots, m; \quad (14)$$

$$t_{0k}^1 = 0, k = 1, 2, \dots, K; \quad (15)$$

$$t_{jk}^s \leq T^s y_{jk}^s, j = 1, 2, \dots, n, \\ k = 1, 2, \dots, K, s = 1, 2, \dots, m; \quad (16)$$

$$x_{ijk}^{rs}, y_{jk}^s, z_k \in \{0, 1\}, \\ i = 0, 1, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n+1, \\ k = 1, 2, \dots, K, s = 1, 2, \dots, m; \quad (17)$$

$$t_{jk}^s \geq 0, j = 0, 1, \dots, n+1, \\ k = 1, 2, \dots, K, s = 1, 2, \dots, m. \quad (18)$$

上述模型中:目标函数(1)表示极小化总配送成本,其中包括动用车辆的固定成本和车辆行驶成本;

约束条件(2)和(3)表示车辆从油库出发;约束条件(4)和(5)表示车辆完成配送任务后返回停车场;约束条件(6)表示加油站 j 对油品 s 的需求量恰好由一辆车满足;约束条件(7)和(8)表示如果车辆 k 为加油站 j 配送油品 s ,则车辆 k 必须进入加油站 j ,完成任务后必须离开加油站 j ;约束条件(9)表示如果有加油站需要车辆 k 提供配送服务,则必须动用车辆 k ;约束条件(10)表示车辆 k 的隔舱 s 容量限制;约束条件(11)~(14)表示卸载顺序约束;约束条件(15)表示车辆 k 从油库出发的时刻为0;约束条件(16)保证各类油品的在途运输时间不超过其最长在途运输时间限制;约束条件(17)和(18)是变量取值约束.

定理1 VRPUS问题是NP难问题.

证明 当油品种类 $m = 1$ 且配送车只有1个隔舱时,问题简化为具有车容量和最大行驶时间约束的车辆路径问题(VRP).由于VRP是经典的NP难问题,VRPUS问题是NP难问题.□

本文将设计求解VRPUS问题的自适应大邻域搜索启发式算法.

2 求解VRPUS的自适应大邻域搜索启发式算法

自适应大邻域搜索算法是由Ropke等^[14-15]首先提出的,该算法在求解车辆路径问题时取得了很好的效果^[16-17].本节将结合VRPUS问题混合整数规划模型的特征,设计求解VRPUS问题的自适应大邻域搜索启发式算法(self-adaptive large neighborhood search heuristic algorithm, LNSH).

2.1 数据预处理

将具有多类油品需求的加油站拆分为多个需求点,拆分后的需求点用二元组 (j, s) 表示,其中 j 表示加油站, s 表示油品类型,需求点 (j, s) 的需求量为 q_j^s .

2.2 算法中的变量及符号说明

除了继续沿用1.3节定义的符号以外,算法中还用到如下符号和变量.

(i, s) :拆分以后的需求点;

$\text{Node}^s = \{(1, s), (2, s), \dots, (n, s)\}$:拆分以后油品 s 对应的需求点集合;

$\text{Route}(k, s)$:由车辆 k 提供油品 s 配送服务的需求点序列,即车辆 k 对应的油品 s 配送路径片段;

$\text{TRoute}(k)$:车辆 k 对应的完整配送路径,路径的起点为油库,终点为停车场;

$\text{Load}(k, s)$:车辆 k 上油品 s 的实际装载量;

X_{best} :算法迭代过程得到的最好解;

X_{current} :当前迭代得到的解;

X_{neighbor} : 当前迭代得到的邻域解;

$z(X)$: 解 X 对应的目标函数值.

2.3 可行解的编码与解码

编码方法: 给定一个可行解 X , 直接将每辆运输车提供服务的需求点按照服务顺序排列, 形成该车辆的配送路径编码, 将所有车辆的配送路径编码合并构成可行解 X 的编码.

解码方法: 给定包含若干需求点的编码序列, 将需求点按照油品卸载顺序重新排序, 在满足模型约束的前提下, 依次安排车辆为序列中的需求点提供服务, 形成一条或多条可行的车辆配送路径.

2.4 基于模拟退火机制的大邻域搜索启发式算法(LNSH)步骤

输入: 删除操作集合 D , 插入操作集合 I , 初始常数 P_{init} , 冷却率 h , 最大迭代次数 Iter_{max} ;

输出: 最优解 X_{best} .

step 1: 利用贪婪算法生成初始解 X_{init} , 计算对应的目标函数值 $z(X_{\text{init}})$.

step 2: 初始化每一种删除操作 $d \in D$ 的选择概率 P_d^t 、每一种插入操作 $i \in I$ 的选择概率 P_i^t ; 设置初始温度 $T = z(X_{\text{init}}) \cdot P_{\text{init}}$; 计数器 $t \leftarrow 1$.

初始化当前解及目标函数值: $X_{\text{current}} \leftarrow X_{\text{init}}$, $z(X_{\text{current}}) \leftarrow z(X_{\text{init}})$.

初始化最优解及目标函数值: $X_{\text{best}} \leftarrow X_{\text{init}}$, $z(X_{\text{best}}) \leftarrow z(X_{\text{init}})$.

step 3: 重复执行 Iter_{max} 次大邻域搜索运算.

While $t < \text{Iter}_{\text{max}}$, 执行下面的循环:

1) 以概率 P_d^t 选择一种删除操作 $d^* \in D$, 对当前解 X_{current} 执行删除操作 d^* , 得到破坏的解 X_{distory} .

2) 以概率 P_i^t 选择一种插入操作 $i^* \in I$, 对破坏的解 X_{distory} 执行插入操作 i^* , 得到邻域解 X_{neighbor} , 计算邻域解的目标函数值 $z(X_{\text{neighbor}})$.

3) 判断邻域解 x_{neighbor} 是否优于当前解 X_{current} : 如果邻域解优于当前解, 则用邻域解更新当前解; 否则以一定的概率接受邻域解. 更新插入和删除操作的选择概率, 令 $t \leftarrow t + 1$.

重复以上操作, 直到 $t = \text{Iter}_{\text{max}}$. 其中 step 3 中第 3) 步使用模拟退火机制确定接受邻域解的概率.

2.5 LNSH算法中各种操作的详细步骤

2.5.1 贪婪算法生成初始解

贪婪算法的思想: 将需求点按照油品卸载顺序分类, 记录尚未安排服务的各类需求点集合; 对于选定的隔舱运输车 k , 优先安排先卸载的油品对应的需求点: 依次从尚未安排配送的需求点中选择满足约

束条件且离车辆当前位置最近的一个需求点加到车辆的配送路径中, 直到所有需求点都无法加入车辆配送路径时, 令车辆返回停车场并输出该车辆的完整配送路径. 如果还有尚未安排配送的需求点, 则动用下一辆隔舱运输车并按照同样的方法为其安排配送路径. 重复上述步骤, 直到所有需求点均被服务为止.

2.5.2 产生邻域解的操作

本文采用两种操作产生邻域解, 即删除操作和插入操作, 并通过自适应权重调整策略提高求解效率. 删除操作指按照一定的规则从可行解对应的车辆路径中删除部分需求点, 将未删除的需求点按原先的顺序排列形成的车辆路径称为破坏的解或临时解; 插入操作指将已删除的需求点插入到破坏的解对应车辆路径中的适当位置, 得到一个新的可行解, 称为修复的解, 即原可行解的邻域解.

1) 自适应权重调整策略.

程序开始设置每种删除与插入操作的选择概率相等, 程序运行过程中根据删除和插入操作的效果修改选中概率. 如果某种操作得到的邻域解优于当前解(或最优解), 则增加该操作对应的选中概率.

2) 删除操作.

本文共使用 9 种删除操作, 分别如下:

① 随机删除 (RR1): 从可行解 X 对应的车辆路径中任意选择一条子路径 $\text{Route}(k, s)$, 在子路径上随机删除一个需求点 (j^*, s) , 重复上述操作 n_{destory} 次.

② 最长距离删除 (WDR): 对于给定的可行解 X , 计算每个需求点 (j, s) 到其所在车辆路径 $\text{Route}(k, s)$ 上前后紧邻的两个点(需求点、油库或停车场)距离之和, 选择距离之和最大的需求点删除.

③ 子路径删除 (RRT): 随机选择一条子路径 $\text{Route}(k, s)$, 删除其中的所有需求点.

④ 相似需求点删除 (SR1): 随机选择一个需求点 (i, s) 删除, 然后寻找与 (i, s) 最相似的同类油品需求点 (j, s) 删除.

$$(j^*, s^*) = \arg \min_j \{ \lambda_1 d_{ij} + \lambda_2 l_{ij} + \lambda_3 |q_i^s - q_j^s| \},$$

其中 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为权重系数. 当 (i, s) 与 (j, s) 在同一车辆路径上时, $l_{ij} = -1$, 否则 $l_{ij} = 1$.

⑤ 距离最近需求点删除 (NDR): 随机选择一个需求点 (i, s) 删除, 然后寻找与 (i, s) 距离最近的同油品需求点 (j, s) 删除.

⑥ 需求量最近的需求点删除 (DR): 随机选择一个需求点 (i, s) 删除, 然后寻找与 (i, s) 需求量最近的同油品需求点 (j, s) 删除.

⑦ 基于历史信息的需求点删除 (HR): 对于每一

个需求点 (i, s) , 记录其在每次迭代得到的可行解中对应的位置费用, 即其所在车辆路径中的前序点 $(a(i), a(s))$ 到 (i, s) , 以及 (i, s) 到后继点 $(b(i), b(s))$ 的距离之和 $d_i^s = d_{a(i), i} + d_{i, b(i)}$. 定义需求点 (i, s) 在历次迭代中的位置费用最小值为最优位置费用, 选择与最优位置费用偏差最大的需求点删除.

⑧最远点删除 (FDR): 随机选择运输车 k , 计算车辆 k 的配送路径 $\text{TRoute}(k)$ 中相邻需求点之间的平均距离 $\bar{d}_{\text{TRoute}(k)}$, 以及将任意需求点 (i, s) 删除以后, 剩余路径 $\text{TRoute}(k) \setminus (i, s)$ 中相邻需求点之间的平均距离 $\bar{d}_{\text{TRoute}(k) \setminus (i, s)}$. 选择使平均距离下降最多的需求点删除.

⑨基于加油站的需求点删除 (SRT): 随机选择一个加油站 i , 将其对应的全部需求点删除.

3) 插入操作.

为了保证插入操作得到的解可行, 对于待插入需求点 (i, s) , 首先从油品 s 对应的路径片段中寻找满足隔舱容量和在途运输时间约束的位置作为备选插入位置, 如果所有路径片段中均不存在备选插入位置, 则生成一条新的配送路径, 将需求点 (i, s) 插入新路径片段中. 本文设计4种不同插入操作, 分别如下:

①贪婪插入 (GI): 对于待插入的需求点 (i, s) , 计算将其插入任意备选位置的对应成本增加量, 选择成本增加量最少的备选位置作为最优插入位置.

②后悔值插入 (RI): 对于待插入需求点 (i, s) , 计算其在所有车辆路径片段 $\text{Route}(k, s)$ 中的最优插入位置和次优插入位置对应的插入成本增量之差 (后悔值), 找出对应后悔值最大的需求点, 将其插入到最优位置. $\Delta f_{(i, s)}^1$ 、 $\Delta f_{(i, s)}^2$ 为将需求点 (i, s) 插入到最优位置和次优位置对应的插入成本增加量, 则需求点 (i, s) 对应的插入后悔值为 $R_{(i, s)} = \Delta f_{(i, s)}^2 - \Delta f_{(i, s)}^1$.

③带扰动的贪婪插入 (GIN): 该插入准则是贪婪插入准则的扩展, 在计算将需求点 (i, s) 插入路径片段 $\text{Route}(k, s)$ 的两个相邻需求点 (j, s) 与 (l, s) 之间的成本增加量时, 加入一个扰动项, 即

$$d_{(i, s)}(\text{Route}(k, s)) =$$

$$\min_{(j, s) \in R(k, s), (l, s) \in R(k, s)} \{d_{ji} + d_{il} - d_{jl} + \bar{d}\mu\varepsilon\}.$$

其中: $\bar{d}$ 为加油站之间的最远距离; μ 为噪音参数, 取值为 0.1 ; ε 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数.

④带扰动的后悔值插入 (RIN): 该准则为后悔值插入准则的扩展, 在计算后悔值时, 加入一个扰动项, 即 $R_{(i, s)} = \Delta f_{(i, s)}^2 - \Delta f_{(i, s)}^1 + \bar{d}\mu\varepsilon$.

2.5.3 模拟退火机制

本文在 LNSH 算法中加入了模拟退火机制. 当邻域解对应目标函数值小于当前解时, 以邻域解代替当前解, 否则以概率 $e^{-(z(X_{\text{neighbor}}) - z(X_{\text{current}}))/T}$ 接受邻域解, 其中 T 为退火温度. 初始温度设置为 $z(X_{\text{init}}) \cdot P_{\text{init}}$, 其中 $z(X_{\text{init}})$ 为初始可行解对应的目标函数值. 算法执行过程中, 温度 T 逐渐降低, 每次降温之后的温度为 hT , 其中 $0 < h < 1$.

3 模拟计算与结果分析

为了验证混合整数规划模型和大邻域搜索算法的有效性, 本节分别利用小规模、中规模、大规模算例进行模拟计算和对比分析, 分析算法的求解精度和计算时间.

3.1 小规模算例

小规模算例的产生方法为: 油库位于坐标原点 $(0, 0)$, 在 $[-40, 40] \times [-40, 40]$ (单位: km) 区域内随机产生多个加油站位置坐标, 对每个加油站随机产生 90[#]、92[#]、95[#] 汽油的需求量, 需求量为 $[0, 4]$ 内的随机整数, 每辆运输车有 3 个隔舱, 隔舱容量均为 6, 车辆行驶速度为 50 km/h、固定动用成本为 100 元、行驶成本为 1 元/km, 各种油品的最长在途运输时间均不得超过 4 h.

对于每一个算例, 先用 Gurobi 软件求解混合整数规划模型得到精确最优解, 再用 LNSH 算法求近似最优解, LNSH 算法的参数设置为: 最大迭代次数为 100, 模拟退火初始温度为 1 000, 降温参数 $h = 0.8$. 对每一个算例用 LNSH 算法运行 10 次, 记录 10 次运算得到的最好解和平均解以及平均运行时间, 具体结果见表 1.

表 1 小规模算例的求解结果分析

算例规模	精确最优解	精确求解时间/s	LNSH 最好解	LNSH 平均解	平均求解时间/s
8	468.04	41.85	468.04 (1.00)*	468.31 (1.00)	1.15
9	359.74	7.6	359.74 (1.00)*	363.19 (1.01)	1.78
10	394.23	61.73	394.23 (1.00)*	399.78 (1.01)	2.22
11	501.31	8.89	504.34 (1.01)	506.59 (1.01)	3.00
12	523.00	20.91	523.00 (1.00)*	525.68 (1.01)	2.99
13	661.90	36.97	662.27 (1.00)	664.17 (1.00)	3.15
15	789.17	149.72	797.68 (1.01)	800.23 (1.01)	3.47

表 1 中:第 1 列为加油站数量;第 2 列和第 3 列分别为 Gurobi 求解整数规划模型得到的精确最优值和求解时间;第 4 列~第 6 列分别为 LNSH 算法 10 次运算的最好解、平均解和平均运算时间,其中第 4 列和第 5 列括号里面的数字为 LNSH 算法的近似比(近似比等于 LNSH 算法得到的目标函数值与第 2 列精确最优值的比值),第 4 列 * 表示 LNSH 算法 10 次运算的最好解与精确最优解相同。

从表 1 可以看出,对于小规模算例,LNSH 算法 10 次运算的最好解和平均解对应的近似比均不超过 1.01,且 10 次运算中找到精确最优解的概率超过 50%。对于小规模算例,LNSH 算法的平均运算时间不足 4 s,远低于 Gurobi 软件求解混合整数规划模型的运算时间。

3.2 中、大规模算例计算结果分析

本节利用经典车辆路径问题的标准测试集 Benchmark^[18] 中的独立数据集生成一批中、大规模算例。将数据集中的配送中心作为油库,客户点作为加油站,将客户点的需求量随机拆分为 3 部分,分别表示加油站对 90[#]、92[#]、95[#] 汽油的需求量。假设每辆运输车有 3 个容量均为 30 t 的隔舱,1、2、3 号隔舱分别可装载 90[#]、92[#]、95[#] 汽油,卸载顺序为 1、2、3。每辆运输车的固定动用成本为 200 元、行驶速度为 50 km/h、行驶每公里的成本为 1 元/km,3 种汽油的最长在途运输时间均不得超过 8 h。

设置 LNSH 算法的最大迭代次数为 100,模拟退火初始温度为 1 000,降温参数 $h = 0.8$ 。对每个算例分别用 LNSH 算法运算 10 次,记录并统计 10 次运算得到的初始解、最终解、平均解、最差解和每次的运算

时间等。由于中、大规模算例无法在短时间内通过求解整数规划模型得到精确最优解,本文将模型中的 0、1 变量 x 、 y 松弛为连续变量,利用 Gurobi 软件求解松弛线性规划模型得到原问题最优解下界,利用该下界分析 LNSH 算法的近似比。详细计算结果见表 2。随着问题规模的增大,求解松弛问题的运算时间和占用内存呈指数增长,对于包含 55 个加油站的算例,利用 Gurobi 软件求解松弛问题的运行时间已经超过 2 h,因此表 2 中未列出超过 55 个加油站的算例对应的松弛问题最优解。

由表 2 可以看出,对于所有的测试算例,LNSH 算法 10 次运算的最差解对应的目标函数值均优于初始解,LNSH 算法 10 次运算得到的平均解比贪婪算法得到的初始解的目标函数值降低 4.1%~14.2%,10 次运算的最好解比初始解的目标函数值降低 4.7%~17.9%。10 次运算的最好解对应的近似比不超过 1.20。从统计结果可以看出,LNSH 算法 10 次运算结果具有较好的稳定性。

对于本文的所有测试算例,LNSH 算法求初始解可行解的运算时间均不超过 0.1 s;当迭代次数为 100 时,对于规模为 101 个点的算例用 LNSH 算法求最终解的总计算时间不超过 40 s。

从 LNSH 算法得到的初始可行解和最终解对应的目标函数值比较可以看出,最终解的目标函数值明显优于初始可行解,且最终解的近似比不超过 1.20。由于 LNSH 算法的运算时间与迭代次数有关,在求解实际问题时,可以根据对运算时间和解的精度要求等,设置 LNSH 算法的迭代次数,以便取得满意的求解效果。

表 2 中、大规模算例的模拟计算结果

算例 编号	算例 规模	松弛问题 最优解	LNSH 初始解	LNSH 最好解	LNSH 平均解	LNSH 最差解	最好解的 近似比
P-n16-k8	16	940.02	1 341.25	1 128.17 (−15.9%)	1 218.135 (−9.2%)	1 266.11 (−5.6%)	1.20
P-n20-k2	20	1 190.66	1 673.26	1 396.03 (−16.6%)	1 501.553 (−10.3%)	1 582.91 (−5.4%)	1.17
P-n23-k8	23	1 228.63	1 734.03	1 442.11 (−16.8%)	1 487.748 (−14.2%)	1 594.16 (−8.1%)	1.17
B-n31-k5	31	1 184.30	1 723.59	1 415.61 (−17.9%)	1 593.2 (−7.6%)	1 676.55 (−2.7%)	1.20
A-n36-k5	36	2 188.81	2 811.37	2 456.66 (−12.6%)	2 622.32 (−6.7%)	2 778.1 (−1.2%)	1.12
P-n40-k5	40	2 507.25	3 282.13	2 792.54 (−14.9%)	2 970.768 (−9.5%)	3 074.76 (−6.3%)	1.11
A-n45-k7	45	2 413.53	3 012.79	2 705.28 (−10.2%)	2 853.89 (−5.3%)	2 896.89 (−3.9%)	1.12
P-n50-k8	50	3 364.97	3 956.35	3 769.27 (−4.7%)	3 796.2 (−4.1%)	3 813.39 (−3.6%)	1.12
A-n55-k9	55	—	5 081.61	4 672.04 (−8.1%)	4 892.639 (−3.7%)	4 998.55 (−1.6%)	—
P-n60-k10	60	—	5 213.49	4 849.84 (−7.0%)	4 873.826 (−6.5%)	4 916.93 (−5.7%)	—
A-n65-k9	65	—	5 547.09	4 976.89 (−10.3%)	5 178.618 (−6.6%)	5 362.56 (−3.3%)	—
P-n70-k10	70	—	6 183.55	5 754.6 (−6.9%)	5 843.385 (−5.5%)	5 946.91 (−3.8%)	—
P-n76-k4	76	—	6 559.94	6 251.27 (−4.7%)	6 326.011 (−3.6%)	6 399.93 (−2.4%)	—
A-n80-k10	80	—	6 851.63	6 413.57 (−6.4%)	6 556.106 (−4.3%)	6 660.63 (−2.8%)	—
P-n101-k4	101	—	7 137.87	6 517.46 (−8.7%)	6 754.465 (−5.4%)	6 880.03 (−3.6%)	—

4 结 论

本文基于成品油二次配送场景提出了具有卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题,建立了混合整数规划模型,并设计了求解模型的LNSH算法,利用不同规模的算例进行模拟计算与分析,验证了模型和算法的有效性.实验结果显示,对于小规模算例,LNSH算法能够以较大的概率得到整体最优解,且运算时间远远小于利用商业软件直接求解整数规划模型.当问题规模增大时,利用LNSH算法可以在短时间内得到近似最优解,近似比上界不超过1.20.

本文结合成品油二次配送场景提出的具有卸载顺序约束的多产品隔舱运输车辆路径问题是车辆路径问题的一种新模型,这类问题广泛存在于液体产品配送过程中.由于液体危险品运输过程需要考虑的因素较多,本文仅研究了较简单的情况,只考虑了一种车型,没有考虑同时使用多种车型进行配送的情况,也没有考虑加油站的配送时间窗等约束.未来可以针对考虑多种车型或带时间窗的成品油二次配送车辆路径问题开展研究,为解决实际问题提供更多理论依据和决策支持.

参考文献(References)

- [1] Liu W S, Yang F, Li M Q, et al. Clustering algorithm for split delivery vehicle routing problem[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(4): 535-540.
- [2] Claudia Archetti, Ann Melissa Campbell, Grazia Speranza M. Multicommodity vs. single-commodity routing[J]. *Transportation Science*, 2016, 50(2): 461-472.
- [3] Claudia Archetti, Nicola Bianchessi, Grazia Speranza M. A branch-price-and-cut algorithm for the commodity constrained split delivery vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 64(C): 1-10.
- [4] Chen P, Golden B, Wang X, et al. A novel approach to solve the split delivery vehicle routing problem[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2017, 24(1/2): 27-41.
- [5] Silvestrin P V, Ritt M. An iterated tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem[J]. *Computers and Operations Research*, 2017, 81(C): 192-202.
- [6] Coelho L C, Laporte G. Classification, models and exact algorithms for multi-compartment delivery problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 242(3): 854-864.
- [7] Enrique Benaventa, Mercedes Landeteb, Enrique Motaa, et al. The multiple vehicle pickup and delivery problem with LIFO constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 243(3): 752-762.
- [8] Pollaris Hanne, Braekers Kris, Caris An, et al. Iterated local search for the capacitated vehicle routing problem with sequence-based pallet loading and axle weight constraints[J]. *Networks*, 2017, 69(3): 304-316.
- [9] Pollaris H, Braekers K, Caris A, et al. Capacitated vehicle routing problem with sequence-based pallet loading and axle weight constraints[J]. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2016, 5(2): 231-255.
- [10] Wang C, Jin C, Han Q P. Model and algorithm for multi-objective joint optimization of three-dimensional loading and CVRP[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(5): 929-934.
- [11] Zhang L F, Yi W L, Liu X L. Two-stage optimization algorithm for large scale secondary petroleum product delivery planning[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36 (11): 2951-2963.
- [12] Li Z, Wu Z. Study on the inventory routing problem of refined oil distribution based on working time equilibrium[J]. *American Journal of Operations Research*, 2016, 6(1): 17-24.
- [13] Popović D, Vidović M, Radivojević G. Variable neighborhood search heuristic for the inventory routing problem in fuel delivery[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(18): 13390-13398.
- [14] Ropke S, Pisinger D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows[J]. *Transportation Science*, 2006, 40(4), 455-472.
- [15] Ropke S, Pisinger D. A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(3): 750-775.
- [16] Milthers N P M. Solving VRP using voronoi diagrams and adaptive large neighborhood search[D]. Denmark: Department of Computer Science, University of Copenhagen, 2009.
- [17] Emrah Demir, Tolga Bektas, Gilbert Laporte. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 223(2): 346-359.
- [18] Augerat P, Belenguer J M, Benavent E, et al. Computational results with a branch and cut code for the capacitated vehicle routing problem[R]. Grenoble: Institut National Polytechnique, 1995: 10-19.

作者简介

李珍萍(1966—),女,教授,博士,从事智能物流系统优化模型与算法等研究,E-mail: lizhenping66@163.com;

周文峰(1966—),男,副研究员,从事物流工程、智能算法的研究,E-mail: zhouwf66@sohu.com;

张煜炜(1992—),女,博士生,从事物流与供应链管理的研究,E-mail: morbenvy@126.com;

杨光(1994—),男,硕士生,从事优化理论与方法的研究,E-mail: 601599829@qq.com;

刘嵘(1993—),男,硕士生,从事优化理论与方法的研究,E-mail: buptrong@163.com.

(责任编辑: 闫 妍)